



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

INSTITUTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

“FILTRACIÓN DE LACTOSUERO A DIFERENTES CONCENTRACIONES COMO  
PRETRATAMIENTO”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO  
AGROINDUSTRIAL

PRESENTA:

BERNABÉ HERNÁNDEZ PRECIADO

Dr. Rafael Germán Campos Montiel  
Director

M. en C. Margarita Elizabeth Cisneros Ortiz  
Co-Directora

Abril 2006

## INDICE

I. RESUMEN	1
II. INTRODUCCIÓN	2
III. MARCO TEORICO	4
<b>3.1 Lactosuero</b>	4
3.1.1 Lactosuero ácido	5
3.1.2 Lactosuero dulce	5
3.1.3 Materia grasa del lactosuero	6
3.1.4 El lactosuero como contaminante	7
<b>3.2 Agua residual</b>	7
3.2.1 Clasificación de las aguas residuales	7
3.2.2 Caracterización de una planta residual	8
3.2.3 Actividades que generan el agua residual	9
<b>3.3 Norma oficial mexicana NOM-001-ECOL-1996</b>	9
<b>3.4 Tratamiento de agua residual</b>	10
3.4.1 Pretratamiento de las aguas residuales	11
3.4.2 Tratamiento primario	13
3.4.3 Tratamiento secundario convencional	13
3.4.4 Tratamiento avanzado (Terciario)	14
3.4.5 Desinfección	14
<b>3.5 Filtración</b>	15
3.5.1 Clasificación de los sistemas de filtración	17

3.5.2 Características operacionales de los filtros	29
3.5.3 Lavado a contracorriente de los filtros	20
<b>3.6 Flotación</b>	22
<b>ANTECEDENTES</b>	23
<i>Tratamiento de aguas residuales agro-industriales</i>	23
<b>OBJETIVOS</b>	32
<i>5.1 Objetivo general</i>	32
<i>5.2 Objetivos específicos</i>	32
<b>HIPÓTESIS</b>	33
<b>MATERIALES Y METODOS</b>	34
<i>7.1 Localización</i>	34
<i>7.2 Lactosuero</i>	34
<i>7.3 Flotación</i>	35
<i>7.4 Filtración</i>	35
<i>7.5 Diseño del experimento</i>	36
<i>7.6 Análisis fisicoquímicos</i>	37
7.6.1 Demanda química de oxígeno (DQO)	37
7.6.2 Potencial de hidrógeno (pH)	40
7.6.3 Sólidos suspendidos	40
7.6.4 Grasa	42
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b>	44
<i>8.1 Demanda química de oxígeno</i>	44
<i>8.2 Sólidos suspendidos</i>	46

<b>8.3 Grasa</b>	48
8.3.1 Grasa retirada por flotación	48
8.3.2 Grasa retirada por filtración	49
<b>8.4 pH</b>	51
<b>CONCLUSIONES</b>	52
<b>RECOMENDACIONES</b>	53
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	54
<b>ANEXOS</b>	55

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b>	Composición media del lactosuero	8
<b>Cuadro 2.</b>	Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en uso en riego agrícola	12
<b>Cuadro 3.</b>	Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales	14
<b>Cuadro 4.</b>	Características físicas de los filtros de medio granular comúnmente utilizados	20
<b>Cuadro 5.</b>	Características del medio granular utilizado	30
<b>Cuadro 6.</b>	Valores de calidad y porcentajes de remoción obtenidos	33
<b>Cuadro 7.</b>	Tratamientos realizados al lactosuero	36
<b>Cuadro 8.</b>	DQO para las diferentes diluciones filtradas	45
<b>Cuadro 9.</b>	Resultados obtenidos para los cuatro tratamientos de SST, SSV y SSF a diferentes concentraciones de lactosuero	46
<b>Cuadro 10.</b>	Grasa retirada por flotación del lactosuero	48
<b>Cuadro 11.</b>	Porcentaje de grasa contenida en el influente y efluente del filtro	49
<b>Cuadro 12.</b>	Porcentaje de grasa retirada del suero mediante los procesos de filtración y flotación	50
<b>Cuadro 13.</b>	pH del influente y efluente de una filtración en arena a diferentes concentraciones de lactosuero	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Grasa acumulada en el biofiltro	27
<b>Figura 2.</b>	Acumulación de grasa en los reactores	28
<b>Figura 3.</b>	Diagrama esquemático del montaje experimental	29
<b>Figura 4.</b>	Esquema de la planta piloto del filtro FAAG-FRD	31
<b>Figura 5.</b>	Instalaciones del CICyTA; UAEH	34
<b>Figura 6.</b>	Empacado del filtro	36
<b>Figura 7.</b>	Medición de la DQO	37
<b>Figura 8.</b>	Curva patrón para DQO	39
<b>Figura 9.</b>	Comparación de las eficiencias de DQO a diferentes concentraciones de lactosuero	44
<b>Figura 10.</b>	Comparación de las eficiencias para SST a diferentes tratamientos con lactosuero (100, 50, 25, 12.5%)	47

## **I. RESUMEN**

Actualmente el lactosuero está ocasionando un problema de contaminación ambiental muy grave en el Valle de Tulancingo debido a que se vierte sin ningún tratamiento biológico a drenajes y/o ríos con una demanda química de oxígeno (DQO) promedio de 27,448 mg/L que equivale a la contaminación generada por una área urbana de 180,000 habitantes. La cantidad de lactosuero producido, según datos del estudio que realizó la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en el 2003 se estimó en una producción de 470,684 L/día.

En este trabajo, se evaluó la filtración del lactosuero como pretratamiento en un sistema de depuración de aguas residuales, principalmente para disminuir su contenido de grasa y materia orgánica no disuelta para mejorar el funcionamiento de los procesos biológicos.

Se utilizó un filtro con una capacidad nominal de 2.5 L, se empacó con grava de piedra poma, con capas de diferentes tamaños (2.36, 1.8, 1.7 y 0.85 mm) a una velocidad de filtración de 4.4 L/hora. Al influente y al efluente se le determinó: demanda química de oxígeno (DQO), pH, sólidos suspendidos totales (SST) sólidos suspendidos volátiles (SSV), sólidos suspendidos fijos (SSF) y grasa.

El lactosuero procedente de la fabricación del queso Oaxaca se filtró a cuatro diferentes concentraciones (12.5%, 25%, 50% y 100%). Los resultados mostraron una remoción de 8,912 mg/L, 5,577 mg/L, 2,418 mg/l y 911.8 mg/L de DQO con 100%, 50% 25% y 12.5% de lactosuero respectivamente, obteniendo una eficiencia de remoción de 11.1%, 12.8%, 8.6% y 8.0%. El pH fue similar en todos los tratamientos con un promedio de 5.6. En SST la eficiencia fue de 42.4%, 39.5%, 39% y 27.1%. La eliminación de grasa en la flotación y filtración fue de 56.3%, 56.8%, 32.3% y 3.5% (100%, 50%, 25% y 12.5% de lactosuero).

La filtración del lactosuero como pretratamiento es una tecnología de bajo costo y escaso mantenimiento, la cual pueden ocupar las micro y pequeñas empresas de la región, con buenos resultados para disminuir la contaminación o para seguir un tratamiento biológico posterior.

## **II. INTRODUCCIÓN**

En la región de Tulancingo existen más de 60 empresas queseras las cuales vierten el lactosuero en sus aguas residuales, principalmente proveniente del queso tipo Oaxaca; lo que aumenta hasta 15 veces su carga orgánica y está causando un impacto negativo en el medio ambiente por el vertido de lactosuero.

Se conoce con exactitud la cantidad de litros procesados generando como subproducto entre 200,000 y 700,000 litros diarios de lactosuero (Campos *et al.*, 2005).

El agua residual de una planta de lácteos tiene características muy diferentes dependiendo del tipo de productos que se elaboran. La principal contribución para la carga orgánica en este tipo de agua residual son la lactosa, proteínas y grasa (Hansen y Hwang, 1990). Por lo general tiene una concentración promedio de 46.6%, 25.8% y 27.6% respectivamente con promedio de 2,855 mg/L de DQO (Vidal *et al.*, 2000).

La completa degradación del agua residual de las industrias depende de la tasa de hidrólisis de cada uno de los diferentes compuestos (Pavlostathis y Giraldo – Gómez, 1991).

La eliminación de la grasa en reactores anaerobios es lenta y se forma una capa que se acumula en los lodos de los reactores de tratamiento secundario. Por lo cual se limita el transporte de nutrientes (Rizema *et al.*; 1993; Sayed *et al.*; 1988), y en ocasiones esta grasa acumulada provoca flotación de lodo (Perle *et al.*, 1995).



La filtración es un proceso en donde el agua pasa a través del lecho filtrante compuesto originalmente de arena fina dispuesto sobre una capa de grava de soporte (Glynn y Heinke, 1999); remueve partículas y materia coloidal no sedimentable e incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, huevos de helmintos virus y otras sustancias además mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes (Jiménez, 2001).

En la presente tesis se determinó el efecto de una filtración con arena de piedra poma en el lactosuero como pretratamiento al tratamiento secundario. Los diámetros empleados en el empacado del filtro fueron: 2.36 mm, 1.8 mm, 1.7 mm y 0.850 mm; esta arena fue colocada dentro de un reactor por capas con capacidad nominal de 2.5 litros en un orden ascendente de tamaño de partícula. El filtro se llenó hasta un volumen de 23.70 cm<sup>3</sup>. Como el flujo fue ascendente se utilizó una bomba peristáltica para bombear el suero a través del medio filtrante a una velocidad de 4.44 litros por hora en promedio vaciando el filtro después de cada filtración para mejorar su eficiencia.

El experimento consistió en realizar diferentes diluciones del lactosuero (100, 50, 25 y 12.5%) cuantificando el porcentaje de remoción en demanda química de Oxígeno (DQO), Potencial de Hidrógeno (pH), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos Suspendidos Fijos (SSF) (APHA,AWWA,WPCF; 1998)., Grasa por el método Gerber (NMX-F-387, 1982).

### **III. MARCO TEORICO**

#### **3.1 Lactosuero**

El lactosuero se define como la parte líquida que queda después de separar la cuajada al elaborar el queso. Representa alrededor del 85 al 90% del volumen de leche usada en la transformación de los productos lácteos y contiene la mayor parte de los compuestos solubles y una pequeña parte de los compuestos insolubles de la leche, lo que representa aproximadamente la mitad de los sólidos totales.

El lactosuero es rico en lactosa, aminoácidos, vitaminas y proteínas solubles muy nutritivas. No obstante tiene un contenido muy elevado de agua. Adicionalmente presenta cantidades variables de minerales, ácido láctico y nitrógeno no proteico (Luquet, 1993).

En la elaboración de quesos, aproximadamente el 90% en peso es lactosuero y el 10% restante se convierte en queso.

La composición del lactosuero varía con la leche utilizada y con el tipo de queso a fabricar, además, depende del sistema de coagulación. El lactosuero proveniente de la elaboración del queso tipo Oaxaca tiene un pH ligeramente ácido (Madrid, 1994).

### **3.1.1 Lactosuero ácido**

Se define como el producto de la fabricación de quesos de pasta fresca y pasta blanda así como de la fabricación de caseína láctica (Veisseyre, 1988). Contiene lactato de calcio, se sabe que cuando la coagulación es realizada por el cuajo el complejo de caseína-calcio se desdobra en paracaseinato de calcio y proteínas del lactosuero, permaneciendo en este caso el calcio unido a las proteínas coaguladas. En un medio ácido, el calcio se separa de la fosfocaseína y aparece en gran cantidad en el lactosuero. Estos sueros tienen un pH cercano a 5 y una acidez de 0.18 a 0.25% de ácido láctico (Madrid, 1994). Torres (1999) menciona que existe un tercer tipo de lactosuero “semi-acido” el cual tiene un pH de 5 a 5.8.

En el caso de los quesos de cuajada lavada, al añadir el agua de lavado se diluyen en mayor o menor grado los elementos del lactosuero. Su contenido en extracto seco varía entonces entre el 4.5 y el 5.5% (Amiot, 1994).

### **3.1.2 Lactosuero dulce**

Son producidos por otros tipos de queserías (pasta prensada y pastas cocidas) y por los fabricantes de caseínas al cuajo. El lactosuero dulce contiene una cantidad mayor o menor de calcio dependiendo de que la coagulación se haya realizado por la acidez o por el cuajo. El lactosuero dulce, por carecer de calcio, no puede formar lactatos y aunque se someta a una acidificación no puede transformarse en lactosuero ácido (Madrid, 1994). El cuadro 1, muestra la composición de los dos diferentes tipos de lactosuero.

### 3.1.3 Materia grasa del Lactosuero

La grasa en el lactosuero se encuentra en pequeñas cantidades (0.1 a 0.4%). Está constituida por 60% aproximadamente de ácidos grasos saturados, 38% de monoinsaturados y 2% de poliinsaturados. Los ácidos grasos de cadena corta son fácilmente hidrolizados por las lipasas que producen rancidez en la grasa y también se puede separar del lactosuero por medio de una descremadora centrífuga, o por diferencia de pesos, dejándolo finalmente con una concentración de 0.1% de grasa (Silva, 1999).

**CUADRO 1.** Composición media del lactosuero.

PARÁMETROS	LACTOSUERO DULCE (%)	LACTOSUERO ACIDO (%)
AGUA	93 – 95	93 -- 95
EXTRACTO SECO	5 – 7	5 -- 7
LACTOSA	4.5 – 5.3	3.8 – 5.2
PROTEÍNAS	0.6 – 1.1	0.2 – 1.1
GRASA	0.1 – 0.4	0.1 – 0.5
SALES MINERALES	0.5 – 0.7	0.5 – 1.2
ACIDO LÁCTICO	0.1 – 0.2	0.2 – 1.2
CLORUROS	0.15 – 0.6	0.16 – 0.6
FINOS	0.05 – 0.3	0.05 – 0.3

(Spreer, 1991)

### **3.1.4 El lactosuero como contaminante**

El lactosuero representa un problema ambiental importante por los grandes volúmenes producidos y por su alta demanda química de oxígeno 60,000-80,000 mg/L. La solución a este problema de contaminación ha tenido una urgente atención debido al incremento en los volúmenes de suero producido, la centralización de las plantas y los requerimientos legislativos estrictos de los países (González, 1996).

En el Valle de Tulancingo se reporta una producción de 423,058 L/día de lactosuero en la región, de esta cantidad, el 50% aproximadamente es vertida al arroyo o drenaje sin ningún tipo de tratamiento físico o químico con una DQO promedio de 30,000 mg/L en las aguas residuales de estas empresas (Campos *et al.*, 2005).

## **3.2 Agua residual**

El agua residual la podemos definir como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas, industrias y comercios, eventualmente aguas subterráneas y pluviales (Metcalf y Eddy, 1996).

La composición de los caudales de aguas residuales depende del sistema de recolección que se emplee y se clasifica de la siguiente forma:

### **3.2.1 Clasificación de las aguas residuales.**

1. Agua residual doméstica o sanitaria: generada en baños, regaderas y actividades tales como lavar, cocinar, etc.
2. Agua residual industrial: de industrias que utilizan el mismo sistema de desagües para sus efluentes tratados o no.

3. Aguas pluviales: particularmente en el caso del sistema de alcantarillado para agua de caño y agua de lluvia. (Van Andel y Lettinga, 1994).

### **3.2.2 Caracterización de una planta de agua residual:**

La industria lechera produce diferentes productos tales como pasteurizados, condensados, yogurt, mantequilla, crema y diferentes tipos de quesos entre ellos el queso Oaxaca (Carozzi, 1993).

Las características de una planta de agua residual de una industrializadora de lácteos pueden ser muy diferentes dependiendo del tipo de productos que se elaboran, la principal contribución para la carga orgánica en este tipo de agua son la lactosa, proteínas y grasa.

La cantidad de estos compuestos influye directamente en la cantidad de productos intermedios como los ácidos grasos volátiles libres, aminoácidos, ácido acético; la interacción de éstos presenta inhibición, toxicidad y dificultades de biodegradabilidad en los tratamientos secundarios (Hansen y Hwang, 1990).

### **3.2.3 Actividades que generan el agua residual de una planta de lácteos**

- Limpieza de carros cisterna
- Limpieza de carros de almacenamiento de leche
- Derrame de leche durante el proceso
- Derrame de leche durante la recepción de la misma
- Limpieza de maquinaria (pasteurizadora)
- Limpieza de los evaporadores del lactosuero
- Esterilización del equipo
- Descarga de agua de enfriamiento
- Descarga de leche y productos en mal estado

De acuerdo con todo esto se estima para cuestiones prácticas que el efluente se compone del 50% de lactosuero y 50% del agua utilizada para el lavado del equipo (Campos *et al.*, 2005).

### **3.3 Norma oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996**

Esta norma establece los límites máximos permisibles de los contaminantes de las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales con objeto de proteger su calidad y posibilitar sus usos, y es de observancia obligatoria para los responsables de dichas descargas, cuadro 2.

**Cuadro 2.** Límites máximos permisibles para contaminantes básicos en uso en riego agrícola.

Parámetros	Prom./mensual (mg./L)	Prom./diario (mg./L)
Temperatura °C	N.A	N.A
Grasa y Aceites	15	25
Materia Flotante	ausente	ausente
Sólidos sedimentables	1	2
Sólidos suspendidos totales	150	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno	150	200
Nitrógeno total	40	60
fósforo total	20	30
Arsénico	0.2	0.4
Cadmio	0.2	0.4
Cianuro	2	3
Cobre	4	6
Cromo	1	1.5
Mercurio	0.01	0.02
Níquel	2	4
Plomo	0.5	1
Zinc	10	20
Coliformes Fecales	1000	NE
Huevos de Helminto	1	NE

N.A. = no aplica      N.E. = no especifica  
Comisión Nacional del agua, 2004.

Los tratamientos se diseñan de acuerdo al efluente para su reutilización o vertido disminuyendo la contaminación, pero las operaciones que a continuación se describen son en forma general y dependiendo del tipo de agua residual cambia el proceso.



### **3.4 Tratamiento de agua residual**

#### **3.4.1 Pretratamiento de las aguas residuales**

Se define como el proceso de eliminación de los constituyentes de aguas residuales cuya presencia puede provocar problemas de mantenimiento y funcionamiento de los diferentes procesos, operaciones y sistemas auxiliares como los sistemas biológicos.

Se puede citar la eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción, retención en superficie (desbaste) y la trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño más o menos uniforme (dilaceración), para la eliminación de sólidos gruesos y trapos, la flotación para la eliminación de grasas y aceites y el desarenado para la eliminación de la materia en suspensión gruesa que cause obstrucciones en los equipos y desgaste excesivo de los mismos, cuadro 3, (Morgan, 1997).

Las operaciones llevadas a cabo en el tratamiento de las aguas residuales en las que los cambios en las características y propiedades del agua se realizan mediante la aplicación de las fuerzas físicas, se conocen como operaciones físicas unitarias (cuadro 3) (Metcalf y Eddy, 1996).

Las operaciones físicas unitarias más comúnmente empleadas en el tratamiento del agua residual incluyen:

**Cuadro 3.** Aplicaciones de las operaciones físicas unitarias en el tratamiento de aguas residuales.

<b>Operación</b>	<b>Aplicación</b>
Medición de caudal	Control y seguimiento de procesos, informes de descargas.
Desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción (retención en superficie).
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño más o menos uniforme.
Homogenización del caudal	Homogenización del caudal y de las cargas de DBO y de sólidos en suspensión.
Mezclado	Mezclado de productos químicos y gases con el agua residual, mantenimiento de los sólidos en suspensión.
Floculación	Provoca la agregación de pequeñas partículas aumentando el tamaño de las mismas para mejorar su eliminación por sedimentación por gravedad.
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesado de fangos.
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades cercanas a la del agua. También espesa los fangos biológicos.
Filtración	Eliminación de los sólidos en suspensión residuales y materia orgánica presente.
Micro tamizado	Mismas funciones que la filtración. También eliminación de las algas de los efluentes de las lagunas de estabilización.
Transferencia de gases	Adición y eliminación de gases.
Volatilización y arrastre de gases	Emisión de compuestos orgánicos volátiles y semi-volátiles del agua residual.

(Metcalf y Eddy, 1996).

### **3.4.2 Tratamiento primario**

Es el tratamiento que elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual. Esta disminución suele llevarse a cabo mediante operaciones físicas tales como el tamizado, la filtración y la sedimentación. El efluente del tratamiento primario suele contener una cantidad considerable de materia orgánica y una demanda bioquímica de oxígeno (DBO) alta. En el futuro, las plantas irán quedando desfasadas, por lo que el fin del tratamiento primario siempre será el preparar el agua para el tratamiento secundario (Tchobanoglous y Burton, 1991).

### **3.4.3 Tratamiento secundario convencional**

Está encaminado a la eliminación de sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables. Se define como la combinación de diferentes procesos normalmente empleados para disminuir estos constituyentes, incluyen tratamientos químicos, físicos y biológicos.

Encontrándose dentro de los biológicos, lodos activados, reactores de lecho fijo como el reactor anaerobio con lecho de lodos y flujo ascendente (por sus siglas en inglés UASB) (Spreer, 1991).

#### **3.4.4 Tratamiento avanzado (terciario)**

Es el utilizado para la eliminación de los constituyentes de las aguas residuales que merecen especial atención, como los nutrientes, los compuestos tóxicos, y los excesos de materia orgánica o de los sólidos en suspensión (Morgan, 1997).

Estos también suelen llamarse procesos químicos los cuales incluyen oxidación, reducción, precipitación y neutralización, son de uso común para el tratamiento de aguas residuales industriales (Morgan, 1997).

#### **3.4.5 Desinfección**

Es la inactivación y/o destrucción de microorganismos (en teoría patógenos, pero no incluye de todo tipo) del agua a un nivel no patógeno; la esterilización, total de la materia viviente en el agua, no es el objetivo. En general, la desinfección tiene por objeto reducir los coliformes fecales hasta menos de 1,000 NMP/100 m/L en agua residual. La cloración es el método más común para desinfectar el abasto público de agua. Se agregan cantidades suficientes de cloro gaseoso o hipocloritos al agua tratada para matar las bacterias patógenas. La cloración es un método de desinfección confiable, relativamente económica y fácil de aplicar. Otros desinfectantes incluyen cloraminas, dióxido de cloro, otros halógenos, ozono, luz ultravioleta y alta temperatura. La desinfección por cloración es deseable cuando existe un riesgo potencial para la salud (Jiménez, 2001).

### **3.5 Filtración**

La filtración es un proceso en donde el agua pasa a través del lecho filtrante compuesto originalmente de arena fina dispuesta sobre una capa de grava de soporte. En la actualidad, son comunes otros medios filtrantes y soportes. Los mecanismos que intervienen en la filtración incluyen el colado de las partículas de mayor tamaño que los poros, la floculación, que se produce cuando las partículas entran en contacto más estrecho dentro del filtro, y la sedimentación de las partículas en los poros del filtro. Con el tiempo los poros del filtro, en particular los de la superficie, se obstruyen y es necesario el lavado a contracorriente (Glynn y Heinke, 1999).

El final del ciclo de filtrado se alcanza cuando empieza a aumentar el contenido de sólidos en suspensión en el efluente hasta alcanzar un nivel máximo aceptable o cuando se produce una pérdida de carga prefijada en la circulación a través del lecho filtrante; luego se termina la fase lavando el filtro a contracorriente para eliminar los sólidos que se han acumulado dentro del lecho granular filtrante. Para esto se aplica un caudal de agua de lavado suficiente para expandir el medio filtrante granular y arrastrar el material acumulado en el lecho. Para mejorar y favorecer la operación de lavado del filtro, suele emplearse una combinación de agua y aire (Jiménez, 2001).

Entre otras funciones la filtración:

- Remueve partículas y materia coloidal no sedimentable.
- Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados, asbestos, bacterias, huevos de helmintos, virus y otras sustancias.
- Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes.
- Asegura la operación continua de la planta y calidad constante del efluente.

La filtración se aplica en potabilización, depuración (nivel primario y terciario). (Jiménez 2001).

El diseño de los filtros y la valoración de su eficacia debe basarse en: (1) la comprensión de las variables que controlan el proceso, y (2) el conocimiento del mecanismo responsable de la eliminación de materia particulada del agua residual.

La operación completa de filtración consta de dos fases: filtración y lavado o regeneración (comúnmente llamada lavado a contracorriente). Mientras la descripción de los fenómenos que se producen durante la fase de filtración es, prácticamente idéntica para todos los sistemas de filtración que se emplean para las aguas residuales, la fase de lavado es bastante diferente en función si el filtro es de funcionamiento continuo o semicontinuo. Tal como expresan sus nombres, en los filtros de funcionamiento semicontinuo la filtración y el lavado son fases que se dan una a continuación de la otra, mientras que en los filtro de funcionamiento continuo ambas fases se producen de manera simultanea (Metcalf y Eddy, 1996).

### **3.5.1 Clasificación de los sistemas de filtración.**

Los principales tipos de filtros de medio granular se clasifican de acuerdo a: (1) tipo de funcionamiento; (2) tipo de medio filtrante empleado; (3) dirección del flujo durante la fase de filtración; (4) procedimiento del lavado a contracorriente, y (5) velocidad de flujo, algunas características se presentan en el cuadro 4.

Los principales tipos de filtros empleados para la filtración de efluentes de aguas residuales de acuerdo al tipo 3 se pueden clasificar en filtros de flujo ascendente y filtros de flujo descendente, cuadro 4 (Glynn y Heinke, 1999).

De acuerdo a la velocidad de flujo (5) se pueden clasificar en:

#### *Filtros de arena lentos.*

Éstos procesan agua a una velocidad de 3 a 4 L/min·m<sup>2</sup>; ofrecen un medio práctico de filtración de agua para pequeñas comunidades y municipios en vías de desarrollo. En comparación con los filtros de arena rápidos, su construcción es más económica, su operación más sencilla, y elimina mejor las bacterias lo cual aumenta su confiabilidad (Glynn y Heinke, 1999).

#### *Filtros de arena rápidos.*

Procesan agua a una velocidad de 80 a 160 L/min·m<sup>2</sup> o más, es decir unas 40 veces mayor que la de los filtros de arena lentos. El medio filtrante también es una capa de arena fina o de antracita y otros materiales que se sostienen sobre una capa de grava u otra estructura de soporte. La velocidad a la cual el agua atraviesa un filtro disminuye poco a poco a medida que se acumulan partículas en los granos del filtro y se reduce el tamaño de los poros. Para conseguir un gasto uniforme se utiliza un controlador externo de gasto; para mantener aproximadamente constante la pérdida total de desnivel a través del filtro, en consecuencia, el flujo (Glynn y Heinke, 1999).

**CUADRO 4.**

Características físicas de los filtros de medio granular comúnmente utilizados.

Funcionamiento del filtro	Tipo de filtro (nom. Común)	Tipo de lecho filtrante	Medio filtrante	Profundidad típica del medio, cm	Dirección de flujo de fluido	Lavado a contracorriente
Semicontinuo	Convencional	Medio único	Arena o Antracita	15	Descendente	Discontinuo
Semicontinuo	Convencional	Medio doble	Arena y Antracita	90	Descendente	Discontinuo
Semicontinuo	Convencional	Medio múltiple	Arena, Antracita y granate	90	Descendente	Discontinuo
Semicontinuo	Lecho profundo	Medio único	Arena o Antracita	120-80	Descendente	Discontinuo
Semicontinuo	Lecho profundo	Medio único	Arena	120-180	Ascendente	Discontinuo
Semicontinuo	Lecho profundo	Medio único	Arena	28	Descendente	Discontinuo
Continuo	Lecho profundo	Medio único	Arena	120-180	Ascendente	Continuo
Continuo	Puente móvil	Medio único	Arena	28	Descendente	Semicontinuo
Continuo	Puente móvil	Medio doble	Arena	40	Descendente	Semicontinuo

(Metcalf y Eddy, 1996).



### **3.5.2 Características operacionales de los filtros granulares comúnmente utilizados.**

Lecho profundo Semicontinuo, mono-medio, flujo descendente: El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. En función del método de control de caudal de caudal circulante, este puede ser constante o variable. Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro invirtiendo el sentido de circulación en el mismo. En la operación de lavado se emplea agua y aire.

Lecho profundo Semicontinuo, mono-medio, flujo ascendente: El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido ascendente. El caudal circulante suele ser constante. Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro aumentando el caudal en la parte inferior del mismo. En la operación de lavado se emplea agua y aire (Metcalf y Eddy, 1996).

Lecho pulsante Semicontinuo, mono-medio, flujo descendente: El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. Conforme aumenta la pérdida de carga, se inyecta aire para romper la capa superficial y para redistribuir los sólidos. El caudal circulante suele ser constante. Cuando la turbiedad del efluente empieza a aumentar, o cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, se lava el filtro, invirtiendo el sentido de circulación en el mismo. Durante la operación de lavado continúa entrando líquido en el filtro. También se utiliza el lavado por vía química.

Lecho profundo Continuo, mono-medio, flujo ascendente: El líquido a filtrar circula en sentido descendente a través del lecho filtrante, que se desplaza hacia abajo en dirección a contracorriente. El caudal circulante suele ser constante. El medio filtrante se lava a contracorriente de forma continua bombeando la arena desde el fondo del filtro con un air-lift hasta un dispositivo de lavado de arenas. Una vez limpia la arena se distribuye en la parte superior del lecho filtrante.

Puente móvil Continuo, mono y bimedia, flujo descendente: El líquido a filtrar circula a través del lecho filtrante en sentido descendente. El líquido se sigue filtrando mientras se lavan las celdas individuales. El caudal circulante suele ser constante. Cuando se alcanza la máxima pérdida de carga admisible, las celdas individuales se lavan sucesivamente, invirtiendo el sentido de flujo en cada una de ellas. El agua de lavado se elimina mediante una bomba (Metcalf y Eddy, 1996).

### **3.5.3 Lavado a contracorriente de los filtros**

Como proceso unitario, la filtración consta de dos etapas una en la que se ensucia el medio y otra de limpieza. La primera, determina básicamente la calidad del efluente y, la segunda, la cantidad de agua producida. En consecuencia, la eficiencia de un filtro es función de ambas (Jiménez 2001; Glynn y Heinke 1999).

Cuando se emplea solo agua para el lavado esta debe de cumplir con dos funciones: la separación de sólidos del medio filtrante y el transporte de los sólidos hacia la salida del filtro; pero si el agua se combina con aire se emplea únicamente como transporte.

Las velocidades de aire y agua empleadas, así como sus combinaciones y el tipo de sistema de distribución seleccionado, deben producir, además de un lavado apropiado, los requerimientos de reacomodo del lecho, ya sea que segregue o mezcle durante la limpieza del lecho.

El lavado a contracorriente de los filtros consiste en bombear agua a presión a través de los desagües o tubos de salida, a través del filtro. Este flujo inverso expande el lecho filtrante hasta un 50%, permite eliminar las partículas de suciedad más ligeras con el agua del lavado y llevarlos hacia la alcantarilla. Cuando no se dispone de alcantarilla, el agua de lavado se trata localmente y si es necesario, los sólidos se llevan a otro lugar para eliminarlos (Jiménez 2001; Glynn y Heinke 1999).

La rapidez del lavado a contracorriente se debe controlar para impedir que los granos de arena o antracita sean arrastrados por el agua de lavado. El agua que se emplee para el lavado es por lo general del 4% del agua producida. Cuando se interrumpe la operación de lavado a contracorriente, el medio filtrante se sedimenta en su lugar para quedar como estaba antes del lavado (Jiménez 2001; Glynn y Heinke 1999).

### **3.6 Flotación**

La flotación es una operación unitaria que se emplea para la separación de partículas sólidas o líquidas de una fase líquida. La separación se consigue introduciendo finas burbujas de gas normalmente aire, en la fase líquida. Las burbujas se adhieren a las partículas y la fuerza ascensional que experimenta el conjunto partícula-burbuja de aire hace que suban hasta la superficie del líquido. De esta forma, es posible hacer ascender a la superficie partículas cuya densidad es mayor que la del líquido, además de favorecer la ascensión de las partículas cuya densidad es inferior, como en el caso del aceite en agua.

Este proceso tiene la ventaja de que permite eliminar mejor y en poco tiempo las partículas pequeñas o ligeras cuya deposición es lenta. Una vez las partículas se hayan en la superficie, pueden recogerse mediante un rascado superficial (Metcalf y Eddy, 1996).

## IV. ANTECEDENTES

### 4.1 Tratamiento de aguas residuales Agroindustriales.

La agroindustria juega un papel importante en la economía del mundo. Al mismo tiempo es uno de los principales contribuidores del problema de la contaminación industrial a nivel mundial. Con tremendo ritmo de desarrollo tecnológico sustancialmente la investigación tiene que arreglárselas con los incrementos de los desechos generados por complejidad generada por las agroindustrias; una alternativa son los sistemas de depuración de aguas para su rehúso (El-Awady y Wahaab, 1999).

Estudio realizado por Campos *et al.*, (2005) reportaron que en el Valle de Tulancingo se vierten aproximadamente 200,000 L/día de lactosuero sin ningún tratamiento.

La DQO que tienen estas aguas residuales son de 27,448 mg/L. si se estima la relación DBO/DQO en una empresa quesera es de 0.6 (Danalewich *et al.*, 1998), la descarga promedio en DBO sería de 16, 469 mg/L que supera más de 100 veces la NOM-ECOL-001-1996 (que es de 150 mg/L DBO).

Las empresas que descargan en los arroyos locales su tratamiento de aguas residuales se debería enfocar para agua de riego destinada al suelo agrícola, por ello se recomienda un tratamiento anaerobio a esta agua residual con lactosuero. La contaminación que generan estas empresas equivale aproximadamente a lo que vierte una población de 180, 000 habitantes. (Campos *et al.*, 2005).

En un estudio realizado por Rizema *et al.*, (1993) se encontró que las tasa de conversión en reactores anaerobios con agua residual proveniente de la industria láctea es limitada por dos posibles factores: primero por la conversión de los ácidos grasos de cadena larga; segundo por el proceso físico de dilución y transferencia de masa de estos ácidos grasos. Pero el tratamiento con lodos biológicos en condiciones anaerobias con este tipo de aguas residuales de las industrias queseras provocan problemas por la acumulación de grasa en los lodos.

La biodegradación de los lípidos se dificulta por la baja disponibilidad (Pretury y Lettinga., 1997). En las aguas residuales de la industria láctea las grasas producen glicerol y ácidos volátiles de cadena larga durante el paso hidrolítico. De cualquier forma los ácidos grasos de cadena larga saturados de 12-14 moléculas de carbono, son reportados como agentes inhibitorios de varios microorganismos (Rizema, 1988). Se encontró que el glicerol es un componente no inhibitorio (Perle *et al.*, 1995).

Lo y Liao, (1986) trabajaron con un reactor anaerobio de rotación biológica en el cual observaron que no pudo tener una operación estable al contacto alimentado con lactosuero en un tiempo de retención hidráulica menor de 5 días por la acumulación de grasa en el medio.

Islas (2006), realizó un estudio en un biofiltro anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente (figura 1) analizando el efecto de la aplicación de altas cargas de lactosuero, encontrando que si se incrementa la velocidad del flujo disminuye la eficiencia en la remoción de la DQO.



**Figura 1.** Grasa acumulada en el biofiltro.

La concentración de ácidos grasos volátiles (AGV's), las condiciones de pH y la acumulación de grasa en el inóculo fueron responsables del bajo rendimiento de la eliminación de la DQO, así como el bajo rendimiento en la formación de metano además de la inestabilidad en la estructura del lodo (Islas, 2006).

Perle *et al* (1995) reportaron flotación de lodos debido al incremento de grasa en concentraciones de 2 a 3 gDQO/L.d de lípidos por consecuencia detectaron una disminución en el porcentaje de remoción de la DQO rendimiento de 82% a 42%. Se afectó la eficiencia global al adherirse cerca del 70% de la grasa a los lodos ocasionando una viabilidad baja y en otros casos resulta potencialmente inhibitoria (Vidal, *et al.*, 2000; Rizema, *et al* 1993; y Alvez, *et al.*, 1997).

Esta acumulación de grasa también la reporta Rosas (2003), donde la concentración de sólidos volátiles totales (SVT) se incrementó a 326% respecto a su concentración inicial, durante cuatro meses lo cual afectó el aspecto del lodo como se muestra en la Figura 2. por la acumulación de grasa.



**Figura 2.** Acumulación de grasa en los reactores.

- a) Reactor inicio del experimento.
- b) Reactor final del experimento.

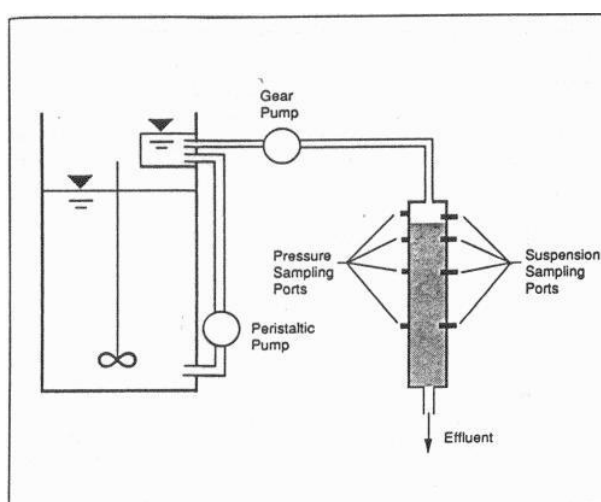
Por lo que es importante disminuir el contenido de grasa contenida en el lactosuero con tratamientos sencillos como la filtración por su bajo costo de instalación y operación como pretratamiento antes de utilizar los reactores biológicos.

Tchobanoglous y Eliassen (1970), trabajaron con medios filtrantes sencillos con una variación en el medio de (0.488 a 0.978 mm) y encontraron que el resultado fue bueno con respecto a la concentración de sólidos suspendidos en el efluente pero sin embargo recomendaron utilizar medios filtrantes de diámetros mayores al igual que Baumann y Huang (1974), que trabajaron con medios de (0.55 a 0.92 mm) la recomendación fue principalmente fundamentada en la velocidad de filtración y el tiempo en que se requería el lavado ya que los filtros se saturaban fácilmente. Tebbutt, (1971) utilizó diámetros del medio filtrante cercanos a 4.7mm, mencionó que no retuvo eficientemente la cantidad de sólidos suspendidos recomendando medios filtrantes de menor diámetro. Dahab y Young (1977), encontraron que para una buena eficiencia en



la remoción principalmente de sólidos suspendidos utilizando un medio filtrante simple es necesario utilizar diámetros de 1 a 2 mm encontrando la máxima eficiencia en el rango de 1.3 a 1.5 mm. Los autores recomiendan realizar combinaciones por capas con diámetros grandes de arena y con diámetros pequeños del mismo material filtrante para minimizar la saturación de los filtros pero al mismo tiempo maximizar la remoción así como realizar experimentos a nivel laboratorio para después llevarlo a planta piloto (Darby y Hawyer, 1990).

Darby *et al.*, (1991) realizó filtraciones a nivel laboratorio (figura 3) para investigar el efecto de las partículas suspendidas con tamaños de partículas de 1.40, 1.70, 2.00, 1.55, y 1.85 mm. y una velocidad de 0.18 cm/s, utilizando como influente agua residual municipal (Austin, Texas), el influente fue mezclado por dos horas previo a su paso por el filtro. Dentro de los parámetros que midieron se encuentran la turbidez y la cantidad de sólidos suspendidos por método estándar los cuales, se encontraban con una carga en un rango de 3.7 a 9.6 mg/L obteniendo eficiencias para la remoción de sólidos suspendidos de un 75% en las primeras corridas y posteriormente de un 70% y 47% para la turbidez. Mencionan también que la eficiencia de la filtración depende de el diámetro del medio filtrante como de la velocidad de filtración (al aumentar la velocidad disminuye la eficiencia) al mismo tiempo también influye la carga del influente.



**FIGURA 3.** Diagrama esquemático del montaje experimental.

Donizeti *et al* (2003), reportaron que en una planta de tratamiento en Sao Carlos se evaluó el desempeño de un sistema de doble filtración constituida por un filtro ascendente de arena gruesa (FAAG) y un filtro rápido descendente con arena convencional (FRD) Cuadro 5, para distintas tasas de filtración, para el FAAG (120 a 360 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d) y en el FRD (160 a 400 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.) utilizando agua proveniente de manantiales superficiales con un pH de 6,4 a 7,0; temperatura de 16 a 26°C. Los filtros se montaron con diferentes camas de diferentes diámetros figura 4.

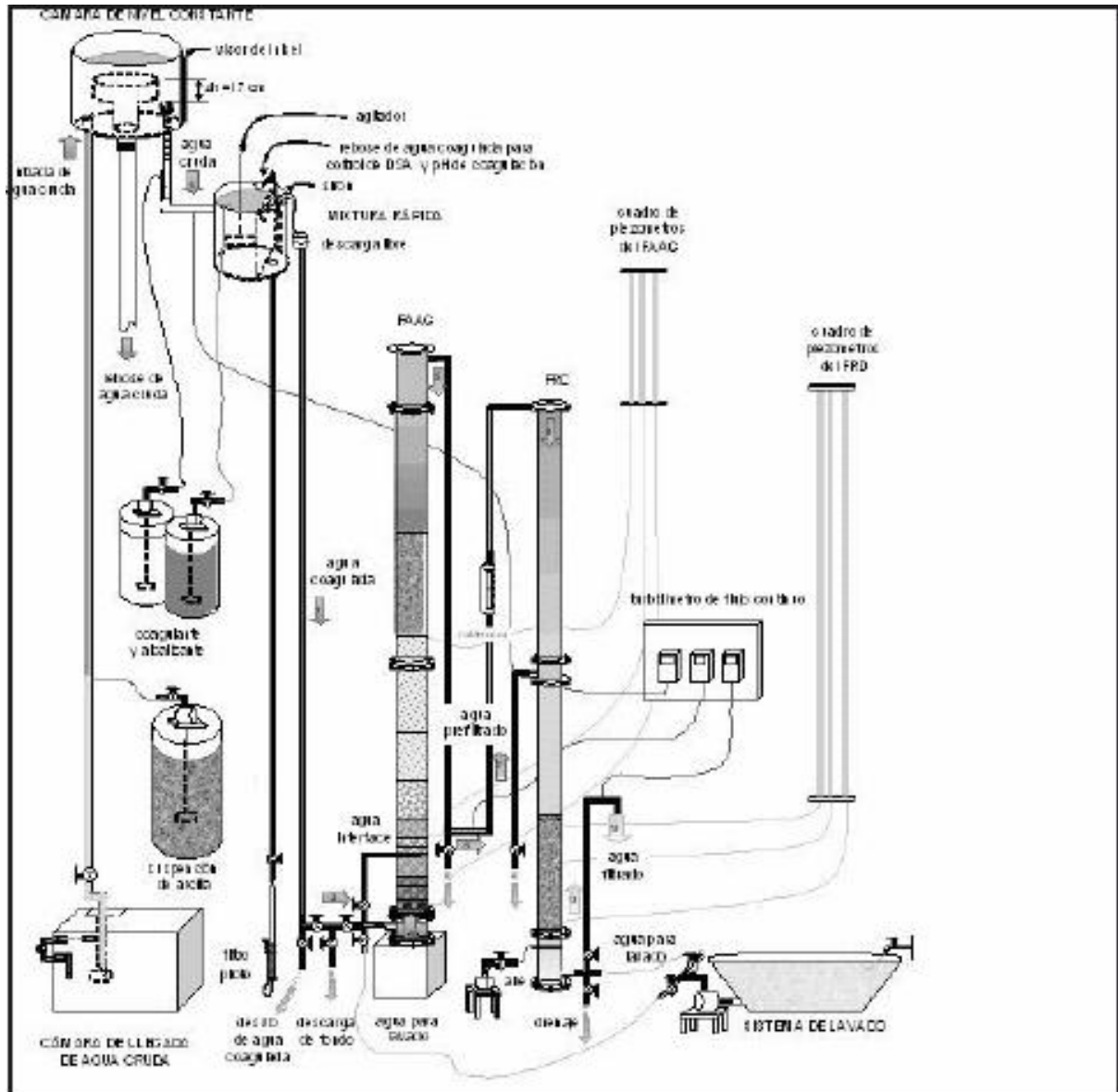
**CUADRO 5.** Características del medio granular utilizado.

Filtro	Material	Subcama	Tamaño de los granos (mm)	Espesor (cm)
Ascendente (FAAG)	Grava (soporte)	Fondo	25,4 – 19,0	10
		Primera	12,7	10
		Segunda	6,4	10
		Tercera	3,2	15
		Cuarta	6,4	7,5
		Superior	12,7	7,5
Descendente (FRD)	Arena	Tamaño de los granos: 1,0 – 2,4 mm	Tamaño efectivo: 1,4 mm	Espesor de la cama: 160 m
		Tamaño de los granos: 0,30–1,41 mm	Tamaño efectivo: 0,43 mm	Espesor de la cama: 70 cm

(Donizeti *et al.*, 2003).

Según los resultados obtenidos para el orden de 120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d para el FAAG y de 200 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d para el FRD, se comprobó que el filtro de flujo descendente contribuyó poco en la remoción global de impurezas, para el FAAG la eficiencia fue en promedio del 50% para los ocho ensayos realizados mientras que para el lavado la pérdida de carga inicial del medio filtrante (limpio) resultó idéntica a la observada antes de la

realización del ensayo, recomendando la utilización de plantas piloto para la optimización de plantas a escala real, así como el estudio de otros materiales filtrantes para los filtros.



(Donizeti *et al.*, 2003).

**FIGURA 4.** Esquema de la planta piloto del filtro FAAG-FRD.

Landa *et al.*, (1998) realizaron un estudio en el cual hicieron una comparación entre dos sistemas de filtración. El filtro Fuzzy (Scheiber tec.) este filtro es un empaque sintético de diferentes porosidades y compresible, consta de una carcasa de material acrílico cuya función es de almacenar el material filtrante; este filtro operó con flujo ascendente a presión y un filtro de arena el cual se empacó en una columna de material acrílico de 30 cm de diámetro y una altura de 3.58 metros; la arena utilizada fue arena silíceo de un tamaño efectivo de 1.2 mm.

Se empleó agua residual municipal tratada en una planta piloto con capacidad de 10 L/seg. El tratamiento fisicoquímico consistió en adicionar 72 mg/L de sulfato de aluminio y 1.2 mg/L de polímero aniónico después de pasar por desarenación; el efluente de esta planta sirvió de influente a los filtros. El influente preparado tuvo una concentración promedio de SST de 31 mg/L y 1.22 huevos de helmintos. Las tasas empleadas en el filtro de arena fueron de 10,12 y 15 m/h mientras que en el filtro Fuzzy fue de 60 m/h.

Dentro de los parámetros medidos se encontraron los siguientes: huevos de helmintos, SST, SSV, SSF, DQO (soluble y total), pH, turbiedad, color, Temperatura y tamaño de partícula.

Los resultados obtenidos (cuadro 6) en este trabajo indican que la producción de agua filtrada para el filtro de arena fue de 19.53 m<sup>3</sup> en un tiempo de 24.6 horas, mientras que para el filtro Fuzzy fue de 155 m<sup>3</sup> en un tiempo menor (12 horas). La calidad de los efluentes para el filtro de arena en cuanto huevos de helmintos fue de 0.16 organismos por litro y el Fuzzi fue de 0.43 org/L, en cuanto sólidos suspendidos totales (SST) en el efluente del filtro de arena se obtuvo en promedio 17 mg/L mejorando el efluente del Fuzzy que fue de 20 mg/L. Para el lavado se tuvo un consumo de agua en el filtro de arena del 2.54% del volumen total filtrado mientras que el fuzzy empleo menos del 1% (Landa *et al.*, 1998).

**CUADRO 6.** Valores de calidad y porcentajes de remoción obtenidos.

Parámetro	Unidad	Arena	Fuzzy	% de remoción	
		promedio	promedio	Arena	Fuzzy
SST	mg/L	17	20	40	42
SSV	mg/L	13	16	38	36
SSF	mg/L	4	4	55	60
Huevos de Helmintos	Org/L	0.16	0.43	85	65
Turbiedad	UTN	57	60	20	-
Color	Pt-Co	243	273	7	-
DQO total	mg/L	200	173	10	10
DQO soluble	mg/L	158	155	7	10

(Landa *et al.*, 1998).

## **V. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo general.**

Determinar el efecto de la filtración con arena como pretratamiento para la disminución de grasa en agua residual con lactosuero ácido.

### **5.2 Objetivos específicos.**

- Comprobar el efecto de la filtración a diferentes concentraciones de lactosuero en los parámetros fisicoquímicos. Demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), Grasa y Potencial de hidrógeno (pH).
- Disminuir el contenido de grasa del lactosuero mediante flotación y filtración con arena de piedra poma.

## **VI. HIPÓTESIS**

La filtración como pretratamiento tiene un efecto positivo en el tratamiento de aguas residuales que contienen lactosuero ácido por disminuir la concentración de grasa.

## **VII. MATERIALES Y METODOS**

### **7.1 Localización.**

Se trabajó en los laboratorios del Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CICyTA) figura 5, localizado en el Instituto de Ciencias Agropecuarias (ICAP) de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo; Tulancingo Hidalgo.



**Figura 5.** Instalaciones del CICyTA; UAEH.

### **7.2 Lactosuero.**

Se utilizó lactosuero ácido, proveniente del queso tipo Oaxaca obtenido de la promotora universitaria de lácteos (PROUNILAC) de manera continua; el lactosuero tiene una acidez promedio de 0.40% de ácido láctico por litro, y un pH promedio de 5.3.

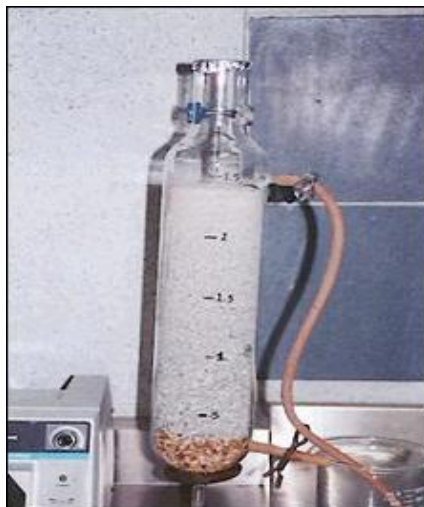


### **7.3 Flotación**

Las muestras se tomaron dos veces por semana tomando los valores de pH con que llegaba el suero; se realizó la dilución correspondiente y se dejó reposar por 24 horas en un recipiente abierto con el propósito de que ocurriera una flotación de la materia grasa hacia la superficie del lactosuero para su fácil remoción; una vez ocurrida esta flotación se retiró la grasa y se cuantificó por diferencia de peso, el porcentaje de acuerdo a los litros que se tuvieron.

### **7.4 Filtración.**

Para la filtración del suero se utilizó arena de piedra poma por ser arena común en la región y de bajo costo; a esta arena se le realizó un tamizado seguido de un lavado con el propósito de obtener diferentes diámetros de partícula, necesarios para el buen funcionamiento del filtro; los diámetros empleados fueron: 2.36 mm, 1.7mm, 1.8mm y 0.850mm. La arena fue colocada dentro de un reactor por capas con capacidad nominal de 2.5 litros en un orden ascendente de tamaño de partícula (figura 6); con pesos de 500g las tres primeras capas y las dos últimas de 250 gr. Se utilizó arena de mar como soporte con un diámetro de 2.36 mm siendo la primera de las 5 capas colocadas. El filtro se llenó hasta un volumen de 23.70 cm<sup>3</sup>. Como el flujo fue ascendente se utilizó una bomba peristáltica Master Flex de Cole Parmer con capacidad de 6-600 rpm para bombear el suero a través del medio filtrante a una velocidad de 4.44 litros por hora en promedio vaciando el filtro después de cada filtración para mejorar su eficiencia.



**Figura 6.** Empacado del filtro.

### 7.5 Diseño del experimento.

El experimento consistió en realizar diferentes diluciones del lactosuero las cuales fueron 100, 50, 25 y 12.5% determinando el porcentaje de remoción para comparar resultados y obtener en que dilución se obtiene un mejor porcentaje de remoción. Cada tratamiento se repitió 10 veces ( $n=10$ ) realizando cada medición por duplicado (cuadro 7).

**Cuadro 7.** Tratamientos realizados al lactosuero.

lactosuero	agua	concentración
1.0 L	0.0 L	100 %
0.5 L	0.5 L	50 %
0.25 L	0.75 L	25 %
0.125 L	0.875 L	12.5 %

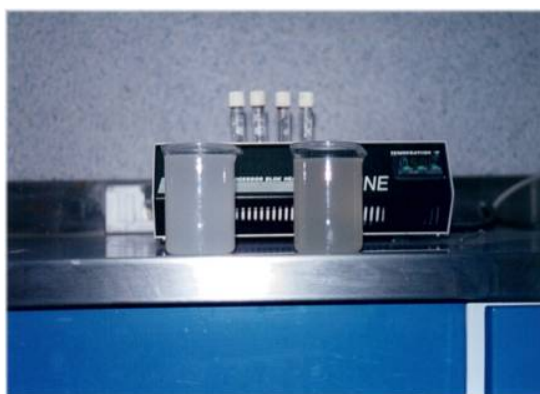
Concentración de la muestra.

## 7.6 Análisis Fisicoquímicos.

Tanto al influente como al efluente del filtro se le determinaron diferentes parámetros: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Potencial de Hidrógeno (pH), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), Sólidos Suspendidos Fijos (SSF), (APHA,AWWA,WPCF; 1998) y grasa por el método Gerber (NMX-F-387, 1982).

### 7.6.1 Demanda química de oxígeno (DQO)

El ensayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. Se utiliza un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse (Figura 7). El dicromato potásico proporciona excelentes resultados en este sentido. El ensayo debe hacerse a elevadas temperaturas, además de que es preciso utilizar un catalizador (sulfato de plata) para facilitar la oxidación de determinados tipos de compuestos orgánicos (APHA, AWWA, WPCF; 1998).



**Figura 7.** Medición de la DQO.

También se emplea para la medición de la materia orgánica presente en aguas residuales tanto industriales como municipales que contengan compuestos tóxicos para la vida biológica, la materia orgánica pueden ser proteínas, carbohidratos o lípidos.

Para este método se prepararon las siguientes soluciones:

Solución digestora. Se secó durante dos horas a 103°C; 50g de  $K_2Cr_2O_7$ ; se enfrió en desecador y se pesaron 42.256g y 33.3g de  $HgSO_4$  en material de vidrio. En un matraz aforado se disolvió el dicromato de potasio en 500 mL de agua destilada agregando el sulfato de mercurio. Se adicionó el baño de hielo y muy lentamente 167 mL de  $H_2SO_4$  puro. Una vez fría la mezcla, se disolvió lentamente y después se aforó a 1L con agua.

Solución de ácido sulfúrico puro con sulfato de plata. Se pesó suficiente sulfato de plata para 10.18g  $Ag_2SO_4$  / 1  $H_2SO_4$  con una pureza de 99%, calculando la cantidad exacta considerando el peso específico y la pureza del ácido sulfúrico utilizado. En un matraz aforado de 1 L, se agregó 300ml del ácido y el sulfato de plata ya pesado. Se dejó en reposo durante dos días para que se disolviera y después se completo el volumen de aforo con el ácido restante.

Se hizo una curva estándar con biftalato de potasio en concentraciones de 0 a 1500mg/L.

#### Procedimiento

Una vez que la parrilla para DQO se calentó por 30 minutos para alcanzar la temperatura de 150 °C, en un tubo HACH con la tapa de rosca se agregó 2 mL de la muestra a analizar de la dilución apropiada y 2 mL de agua destilada para el blanco, añadiendo 1 mL de la solución digestora.

Se añadió lentamente 2 mL de solución de ácido de plata y tapando perfectamente, posteriormente se homogenizó la mezcla mediante agitación con la ayuda del vórtex Fisher Scientific colocando los tubos en la parrilla para digestión a 150 °C, durante 2 horas.

Transcurrido el tiempo se sacaron los tubos de la parrilla y se dejaron enfriar, después, en el espectrofotómetro Spectronic Genesys 5 se ajustó la longitud de onda a 625 nm., Se calibro con el blanco preparado para leer las muestras ya fríos los tubos.

Las muestras ya leídas se fueron desechando en el recipiente destinado para estos residuos, la DQO se calculó tomando como base la curva patrón de diftalato de potasio que anteriormente se preparó en concentraciones de 0, 250, 500, 750 y 1000 mg/L (APHA, AWWA, WPCF; 1998) (figura 8).

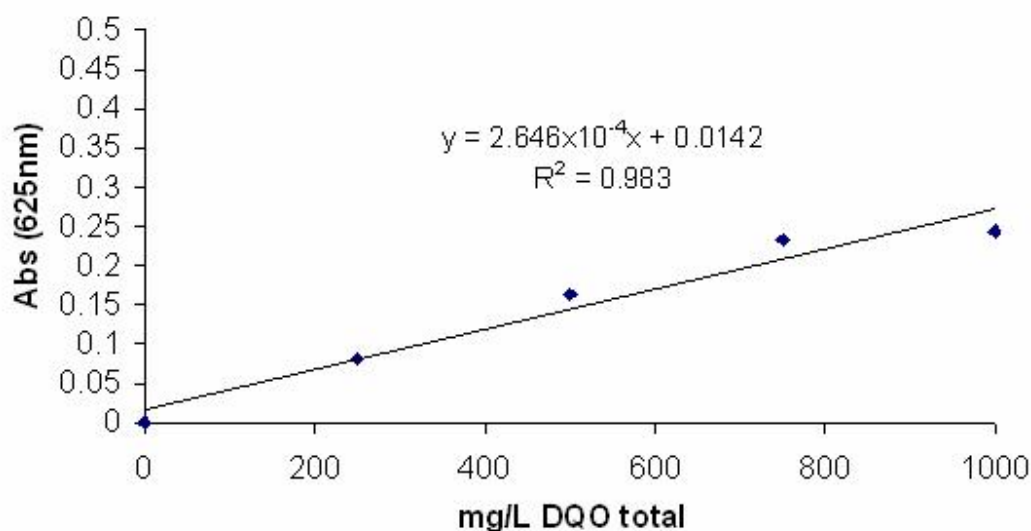


Figura 8. Curva patrón para DQO.

### **7.6.2 Potencial de hidrógeno (pH)**

La concentración de ión hidrógeno es un parámetro de calidad de gran importancia tanto para el caso de aguas naturales como residuales. Esta determinación se hizo con un potenciómetro Hanna Instrument calibrado con soluciones buffer Hysel de México de pH 4 y 7.

### **7.6.3 Sólidos suspendidos.**

Sólidos suspendidos totales (SST), Sólidos suspendidos volátiles (SSV) y Sólidos suspendidos Fijos (SSF).

Se filtró una muestra bien mezclada a través de un papel filtro y el residuo retenido se secó a peso constante en una cápsula de aluminio a peso constante en un horno a 103 – 105 °C durante 24 h. El aumento de peso del filtro representó los SST. Después se incinero en una mufla a una temperatura de 550 °C; los sólidos remanentes representaron los valores de los SSF, mientras que la pérdida de peso por ignición representó los SSV.

#### *Procedimiento*

##### *Preparación del filtro:*

- a. Se colocó el papel filtro en la charola de aluminio inerte en la estufa por 24 h pasado el tiempo se sacaron y pusieron en el desecador para enfriarse durante 1 hora.
- b. Después del desecador el filtro y el crisol, se pesaron por separado registrando el peso.

- c. Se conectó a la bomba de vacío (Edwards Inlet Catchpet) un matraz Kitazato al cual se le colocó un embudo de porcelana con el filtro adhiriéndose con agua destilada.
- d. Se homogenizó la muestra y se colocaron 20 mL en el filtro colocado sobre el embudo Buchner.
- e. Después se retiró el filtro cuidadosamente colocándolo en un crisol, para llevarlos a la estufa a 103 – 105 °C durante 24 horas.
- f. Después de las 24 horas se sacaron y se volvieron a colocar dentro del desecador durante 1 h para su enfriamiento, una vez fríos se pesaron registrando la lectura.
- g. Posteriormente se llevaron a la mufla calentada previamente a 550 °C durante 3 horas.
- h. Nuevamente se enfriaron en el desecador por una hora y se pesaron registrando la lectura.

*Cálculos:*

$$\text{mg de SST/L} = \left[ \frac{(\text{peso después de la estufa (mg)} - \text{peso del filtro y crisol (mg)}) \times 1000}{\text{Volumen de la muestra (mL)}} \right]$$

$$\text{mg de SST/L} = \left[ \frac{(\text{peso después de la estufa (mg)} - \text{peso filtro} - \text{peso mufla (mg)}) \times 1000}{\text{Volumen de la muestra (mL)}} \right]$$

$$\text{mg de SSF/L} = \text{mg SST/L} - \text{mg SSV/L}$$

#### **7.6.4 Grasa.**

Método de Gerber: se fundamenta en el empleo del ácido sulfúrico y la fuerza centrífuga para separar la grasa de la leche o sus derivados (suero) en butirómetros que permiten medir directamente el porcentaje de grasa por volumen. Al mezclarse la grasa con el ácido en determinadas proporciones, el ácido primero precipita y luego disuelve las proteínas y demás constituyentes de la leche con excepción de la grasa. Al mismo tiempo el ácido digiere la membrana del glóbulo de grasa y eleva la temperatura de la muestra y la viscosidad. En estas condiciones la grasa funde, se aglomera y tiende a separarse favorecidos por la diferencia de su densidad (0.93) y la densidad de la mezcla ácida (1.43), el método de Gerber utiliza alcohol isoamílico, el cual ayuda a disminuir la tensión interfacial favoreciendo la ruptura de la emulsión, la separación de la grasa además de prevenir la sulfonación y carbonización de la misma (NMX-F-387, 1982).

Para esta prueba se debe de tener un peso específico para cada reactivo el cual se preparó previamente:

- Ácido Sulfúrico (p.e. 1,82 - 1,83).
- Alcohol Isoamílico (p.e. 0,810 – 0,812),

#### *Procedimiento:*

Para obtener resultados confiables se realizaron dos determinaciones en paralelo.

1. Se transfirieron  $10 \pm 0.2$  mL de ácido sulfúrico enfriado entre 15,5 y 21,1 °C a un butirómetro de Gerber.
2. Se adicionó cuidadosamente 11 mL de lactosuero a no más de 23,9 °C (lentamente al principio para evitar la mezcla) y 1 mL de alcohol isoamílico



cuidando no adicionar el alcohol directamente sobre el ácido para evitar un calentamiento excesivo.

3. Después se tapó y sujetando el butirómetro por los extremos se agitaron los líquidos totalmente evitando quemarse y especialmente con proyecciones de la mezcla ácida. Cuando la mezcla se homogenizó por completo se continuo la agitación por 10 a 15 segundos más para asegurar la total digestión además de invertir el butirómetro varias veces para mezclar el ácido remanente en el cuello.
5. Se Llevaron los butirómetros invertidos a la centrifuga a 1000 rpm por cinco minutos.
6. Transcurrido el tiempo se retiraron los butirómetros y se tomó la lectura inmediatamente de el porcentaje de grasa, haciendo coincidir la base de la columna con el cero, por medio del ajuste del tapón.

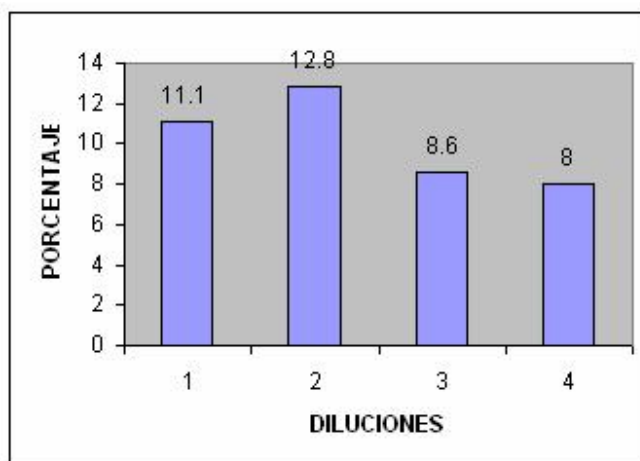
La columna de grasa separada se observó de un color amarillo translúcida sin partículas suspendidas y el líquido bajo la columna generalmente estaba claro. A veces se formaban unos depósitos entre la capa de la materia grasa y la solución atacada, esto pudo ocurrir por que el suero no se había mezclado completamente con el ácido.

## VIII. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 8.1 Demanda Química de Oxígeno.

En la figura 9, se comparan las eficiencias en los diferentes tratamientos. La dilución del 50% de lactosuero fue la que obtuvo la mayor eficiencia con 12.8% de remoción de DQO pero en general se obtuvo un promedio del 10%. Coincidiendo con lo reportado por Landa, *et al.*(1998), que en filtros con arena y Fuzzy obtuvieron los mismos resultados con eficiencias del 10%. Es importante mencionar que en la región Tulancingo las empresas queseras tienen una concentración aproximadamente de 41 000 mg/L de DQO que corresponde a una concentración aproximada del 50% del lactosuero (Cuadro 8).

Entre la concentración de lactosuero y la eficiencia en la remoción de DQO tuvo una correlación del  $r=0.65$ . Aunque se esperaba una correlación más alta, debido a que a mayor concentración de lactosuero, debería haber mayor retención y por lo tanto un incremento en la eliminación de DQO.



**Figura 9.** Comparación de las eficiencias de DQO a diferentes concentraciones de lactosuero.

La eficiencia trabajando con el suero al 100% y diluido al 50% fueron ligeramente mayores a las reportadas Landa y col. (1998) que obtuvo un porcentaje de remoción del 10% para ambos filtros. Y en nuestro caso fue 11.9%. es importante que en la región Tulancingo el lactosuero tiene una concentración del 50% debido a que se mezcla con el agua de proceso.

Como se observa en el cuadro 7, el lactosuero al 100% tuvo una concentración de 79,239 mg/L de DQO. El tratamiento con 12.5% de lactosuero tuvo una DQO de 12,392 mg/L en promedio, siendo el lactosuero un residuo agroindustrial muy contaminante.

**Cuadro 8.** DQO para las diferentes diluciones filtradas.

Tratamiento concentración	DQO (mg/L)	
	influyente	efluente
100	79239±4671	70327±2491
50	41439±7722	35862±5821
25	28258±2861	25840±2847
12.5	12392±2316	11480±2659

Para las diluciones de 25% y 12.5% se obtuvieron eficiencias menores debido a que al ser mayor cantidad de agua que suero y que las partículas del medio filtrante son mayores a .85 mm el suero pasa por el medio filtrante como tal dejando un porcentaje menor de DQO tal y como lo demuestran las eficiencias obtenidas (Figura 9).

## 8.2 Sólidos Suspendidos.

En el cuadro 9 se presentan los resultados de los SST, SSV y SSF. Se observa mayor eliminación en el tratamiento con lactosuero al 100% con una retención de 124.2 mg/L y la menor con el tratamiento de 12.5% de lactosuero con una retención de 27.9 mg/L.

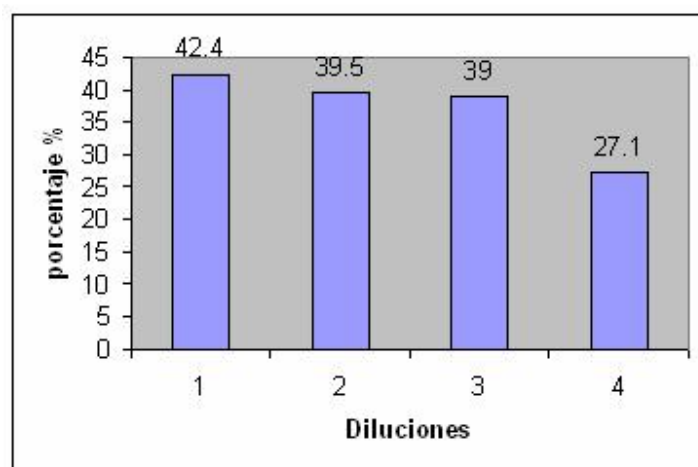
La cantidad de materia orgánica representada como SSV fue en promedio del 85%. Mientras los minerales representados como SSF fue del 15% (Cuadro 9).

**Cuadro 9.** Resultados obtenidos para los cuatro tratamientos de SST, SSV y SSF a diferentes concentraciones de lactosuero.

Tratamiento	SST		SSV		SSF	
	Influente	efluente	Influente	efluente	influyente	efluente
<b>100%</b>	276.4±123	152.2±73.1	222.9±92.9	112.7±48.4	53.5±59.6	39.4±28.2
<b>50%</b>	269.0±206	152.8±98.7	252.9±208.3	119.8±67.7	16.0±7.6	32.9±51.6
<b>25%</b>	119.3±24.9	73.3±20.8	107.6±23.4	50.2±16.3	11.7±3.1	23.1±9.6
<b>12.5%</b>	106.1±15.9	78.2±18.6	82.0±15.2	53.6±13.9	24.0±3.7	24.6±7.4

SST: Sólidos suspendidos totales  
 SSV: Sólidos suspendidos volátiles  
 SSF: Sólidos suspendidos fijos

Como se observa en la figura 10, las eficiencias de SST en los tratamientos con lactosuero diluido fueron disminuyendo debido a la menor concentración de sólidos en el influente, por lo tanto, el medio filtrante va reteniendo menor porcentaje de sólidos. El coeficiente de correlación fue de  $r=0.7$  entre las diferentes concentraciones de lactosuero y la eficiencia de los SST. Es decir, la eficiencia en remoción de SST es directamente proporcional a la concentración del suero filtrado como se demuestra en la figura 10.



- 1: Lactosuero al 100%
- 2: Lactosuero al 50%
- 3: Lactosuero al 25%
- 4: Lactosuero al 12.5%

**Figura 10.** Comparación de las eficiencias para SST a diferentes tratamientos con lactosuero (100, 50, 25, 12.5%).

Los resultados en SST también son muy cercanos a los obtenidos por Landa y col. (1998) que obtuvo un porcentaje de remoción del 40% para el filtro de arena y de un 42% para el filtro Fuzzy mientras que para Donizety, (2003) y Darby (1991), el porcentaje de remoción fue de 50 y 75% respectivamente lo cual puede ser debido al diámetro de partícula empleado ya que al utilizar diámetros más finos aumenta el porcentaje de remoción (Tchobanoglous y Eliassen 1970; Baumann y Huang 1974).

### 8.3 GRASA.

#### 8.3.1 Grasa retirada por flotación.

Como se observa en el cuadro 10 a mayor concentración de lactosuero mayor porcentaje de retención de grasa con una  $r=0.80$

**Cuadro 10.** Grasa retirada por flotación del lactosuero.

GRASA (%)		
Tratamiento	contenido de grasa	% de grasa retirada
100%	0.4±0.4	49.2±21.4
50%	0.2±0.08	48.8±20.5
25%	0.1±0.03	27.3±8.5
12.5%	ND	ND

ND: no detectado

Las partículas de grasa por ser de menor densidad que el resto del medio acuoso flotan a la superficie después de un tiempo de reposo para después ser retiradas mediante un rascado superficial (Metcalf y Eddy, 1996) lo cual optimiza el funcionamiento del filtro ya que evita que se sature más rápidamente por la acumulación de grasa en el medio disminuyendo la velocidad de filtración y la eficiencia del mismo.

Este método es muy sencillo y práctico el cual disminuye la contaminación y ayuda a los sistemas secundarios de tratamiento de aguas residuales que contienen lactosuero.

### 8.3.2 Grasa retirada por filtración.

Como se observa en el cuadro 11, la eficiencia promedio fue de 29.5%. A mayor concentración de lactosuero, mayor eficiencia en remoción de grasa, encontrándose entre la grasa y la concentración de lactosuero un coeficiente de correlación de  $r= 0.8$ .

Los porcentajes en contenido de grasa para el influente son menores a los estándares reportados debido a la eliminación preliminar por flotación, disminuyendo el contenido de grasa en el lactosuero para mejorar la eficiencia del filtro, ya que el contenido de grasa al 100% en suero ácido es de 0.1 a 0.5% (Madrid, 1994). Y en el tratamiento de 100% tiene en promedio 0.2% de grasa (Cuadro 11). Esto es debido a la flotación inicial de grasa.

**Cuadro 11.** Porcentaje de grasa contenida en el influente y efluente del filtro.

Tratamiento	GRASA (%)	
	Influente	Efluente
100%	0.24±0.10	0.17±0.11
50%	0.22±0.09	0.14±0.08
25%	0.17±0.06	0.12±0.05
12.5%	0.15±0.04	0.12±0.04

Al disminuir el contenido de grasa presente en el lactosuero por medio del tratamiento primario flotación y filtración, se puede mejorar el funcionamiento de los reactores biológicos como tratamiento secundario como lo menciona Islas (2006) quien recomienda un tratamiento preliminar al lactosuero para disminuir su contenido de grasa antes de ser tratado biológicamente para evitar tener problemas con la acumulación de grasa en un biofiltro anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente y a que la acumulación de grasa repercutió en un bajo rendimiento de la eliminación de la DQO, así como el bajo rendimiento en la formación de metano además de la inestabilidad en la estructura del lodo.

Por lo tanto al retirar la grasa por medio de la filtración se mejora la eficiencia global de los tratamientos biológicos ya que en algunos casos se acumula hasta un 70% de la grasa del lactosuero a los lodos (Perle *et al.* 1995) ocasionando que los lodos por la acumulación de grasa presenten una viabilidad baja y en otros casos resulten potencialmente inhibitoria (Vidal, *et al.*, 2000; Rizema, *et al.*, 1993; y Alvez, *et al.*, 1997).

Al comparar flotación y filtración (cuadro 12) se puede notar que es más eficiente eliminar la grasa mediante flotación con una retención de casi 7 veces mayor a el tratamiento con lactosuero puro (100%). Sin embargo, es recomendable utilizar la filtración para poder eliminar SSV, SSF y SST ya que únicamente con la flotación no se podrían eliminar estos parámetros.

**Cuadro 12.** Porcentaje de grasa retirada del suero mediante los procesos de filtración y flotación.

Tratamiento	Flotación		Filtración	
	% de grasa		% de grasa	Grasa total retirada
100%	49.2±21.4		7.1±3.7	56.34%
50%	48.8±20.6		8±8.2	56.8%
25%	27.3±8.5		5±3.3	32.3%
12.5%	ND		3.5±3.3	3.5%

ND: no detectado.



## 8.4 pH

**Cuadro 13.** pH del influente y efluente de una filtración en arena a diferentes concentraciones de lactosuero.

	pH	
tratamiento	influyente	efluente
<b>100%</b>	5.68±.26	4.6±.21
<b>50%</b>	5.71±.22	4.5±.27
<b>25%</b>	5.64±.23	4.6±.27
<b>12.55%</b>	5.67±.24	4.56±.26

Como se puede apreciar existe una disminución en el pH del efluente, debido a una reacción con la piedra poma. No puede ser atribuido a una fermentación por la velocidad de filtración (4.4 L/h) es decir el tiempo hidráulico de retención (THR) es de 0.1 horas por lo cual no podría ocurrir una fermentación. Este pH no es el adecuado para un tratamiento biológico ya que estos sistemas funcionan correctamente a un pH entre 6 y 8 sin embargo el pH puede ser ajustado por agentes químicos como  $\text{NaHCO}_3$  antes de pasar a estos procesos. (Betancourt *et al* 1990).

## **IX. CONCLUSIONES**

1. La filtración junto con la flotación es una buena opción de tratamiento preliminar para la eliminación de grasa con remoción de un 56.8% como máximo.
2. Existe una eliminación de DQO en la filtración con un promedio del 10%.
3. Con el lactosuero al 100% y al 50% se obtuvo una disminución del 41% en sólidos suspendidos totales suficiente en para los procesos físicos.
4. El pH obtenido del proceso es inhibitorio para los sistemas biológicos menores a 4.6.
5. La filtración y flotación es un sistema sencillo y de bajo costo que ayudaría a disminuir la contaminación de las empresas queseras de la región al remover grasa, sólidos suspendidos totales y DQO sin embargo se requiere de un posterior tratamiento biológico.

## X. RECOMENDACIONES

- Experimentar con más medios filtrantes existentes en el valle de Tulancingo y comparar resultados.
- Seguir con tratamientos biológicos anaerobios como UASB (reactor anaerobio de cama de lodo de flujo ascendente) para disminuir la carga orgánica hasta ser factible su uso para riego agrícola.
- Realizar experimentos a nivel piloto en m<sup>3</sup>.

## XI. BIBLIOGRAFIA

1. APHA/AWWA/WPCF., 1998 Standard methods for examination of water and Wastewater. 20<sup>th</sup> Ed. American Public Association. pp 2-103.
2. ALVES, M. M., ALVARES PEREIRA, R. M, MOTA VIERA, J. A., MOTA, M. 1997. Effect of lipids on biomass development in anaerobic fixed-bed reactors treating a synthetic dairy waste. In: *proceeding of the international Symposium of Environmental Technology Part. II* Oostende, Belgium, 21-24 April, pp. 521-524.
3. AMIOT J., 1994. Ciencia y tecnología de la leche. Traducción al español de Oria, R. Ed. Acribia, S.A. Zaragoza, España. Pp. 376, 377,
4. BAUMAN, E. R. y HUANG, J. Y. C. 1974. granular filters for tertiary wastewater treatment. *J. Water Pollut. Control Fed.* Vol. 46, pp. 1958.
5. BETANCOURT, M. S., DOMÍNGUEZ, M., ALMEIDA, P.M. 1990. Estudio de los principales sistemas de tratamiento anaeróbico de residuales. Vol 24. num. 2-3, pp 24-27.

6. CAMPOS, M. R. G., PIMENTEL, G. D. J., CISNEROS, O. M. E., HERNÁNDEZ, F. A. D., MONROY, H. O. M., VERNON, C. J. 2005. Problemática Ambiental derivada de las empresas queseras en el valle de Tulancingo, Hidalgo; México. V Convención Internacional Sobre el Medio Ambiente y Desarrollo. Cuba 1:55.
  
7. CAROZZI, A. 1993. Waste Pretreatment of the Dairy industry. In *Proceedings of the Fifth seminar on Wastewaters Treatment by Anaerobic Digestion* May, Valladolid Spain, 26 – 28.

8. DAHAB, F. y YOUNG, J. C., 1977. Unstratified-Bed Filtration of Wastewater. *J. Environmental Eng.* Vol. 103, 21.
9. DANALEWICH, J. R., PAPAGIANIS, T. G., BELYEA, R. L., TUBLENSON, M. E., y RASKIN, L., 1998. Characterization of Dairy Waste Streams, current treatment practices, and potential for biological nutrient removal. *Water Research.* Vol. 32 (12), pp 3555-568.
10. DARBY, J. L. y LAWYER, D. F., 1990. Ripening in Depth Filtration: Effect of particle size on removal and head loss. *Environmental Science and Technology.* Vol. 24 p.1069.
11. DARBY, J. L., LAWYER, D. F. y WILSHUSEN, T. P., 1991. Depth filtration of Wastewater: particle size and ripening. *Research Journal WPCF*, vol. 63 (3) pp 228-238.
12. DONIZETI, D. P., KIYOMI, K. E., BERNARDO, D. L., 2003. Tratamiento de agua de abastecimiento utilizando un filtro de arena gruesa con flujo ascendente como pretratamiento para la filtración rápida descendente. *Agua Latinoamérica.* Vol. 3, (5) pp 1-9.
13. EL-AWADY, M. H. y WAHAAB, R.A., 1999. Agro-Industry Wastewater Treatment. *Environmental Technology*, Vol. 20, pp 1001-1004.
14. GLINN, J. H., y HEINKE, G. W., 1999. Ingeniería Ambiental. Traducción al español por Héctor Escalona y García. Ed. Prentice Hall. México. Segunda edición. pp 400-447.
15. GONZÁLEZ, S., A., 1996. The biotechnological utilization of cheese whey: a review. *Bioresource Technology.* Vol. 57, pp 1-11

16. HANSEN C.L. y HWANG, S.H. 1990. Use of anaerobic sludge blanket (UASB) reactor to treat whey permeate. In: *Proceedings of the sixth International Symposium on Agriculture and Food Processing Wastes*. Am. Soc. Eng. Chicago. Vol. 111. pp 124.
17. ISLAS P. M., 2006. Efecto de altas cargas de lactosuero en un biofiltro anaerobio de lecho de lodos de flujo ascendente. Tesis Maestría. Centro de Investigación en Ciencia y tecnología de los Alimentos. CICYTA. UAEH. México.
18. JIMÉNEZ C. B. E., 2001. La Contaminación Ambiental en México., causas, efectos y tecnología apropiada. Ed. Limusa. México, D.F. pp 211-221.
19. LANDA, V. H., LEIVA, A. A. y JIMÉNEZ, C. B. 1998. Nuevas Tecnologías para la filtración de agua residual. 1er Simposio Latinoamericano de Tratamiento y Reuso del Agua y Residuos Industriales. Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco. 2 (46) pp 1-10
20. LETINGA, G. 1996 Sustainable integrated biological wastewater treatment. *Water Science and technology*. Vol. 21 pp. 87 – 107.
21. LO, V. K. y LIAO, H. P., 1986. Digestion of cheese whey with anaerobic rotating biological contact reactor. *Biomass*. Vol. 10 pp 243-252.
22. LUQUET, F. M., 1993., Leche y productos lácteos, vaca oveja y cabra. Editorial Acribia. Zaragoza España. pp 287-294
23. MADRID, V. A., 1994. Nuevo manual de tecnología quesera. AMV Ediciones. Madrid España. pp 209-221.

24. METCALFT y EDDY. 1996. Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, vertido y reutilización Vol. 1 Traducción al español por Juan Trillo. Mc Graw-Hill Inc. U.S.A. pp 54-146.
25. MORGAN S. 1997. Mejoras al comportamiento hidráulico de los reactores UASB y filtro sumergido aerobio: estudios de trazado a escala laboratorio y piloto.. Tesis de Maestría . Universidad Autónoma del Estado de México.
26. [NMX-F-387] Norma Mexicana 1982. Determinación de grasa butírica por el método Gerber.
27. Norma Oficial Mexicana, “Análisis de Agua-Determinación de Demanda Bioquímica de Oxígeno”, Designación NOM-AA-28-1976.
28. Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de los contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
29. PAVLOSTATHIS, S. G., y GIRALDO-GOMEZ, E., 1991. Kinetics of Anaerobic treatment. *Water Science and Technology*, Vol. 24 (4), pp 35-59.
30. PERLE, M., KIMCHIE, SH. y SHELEF, G., 1995. Some biochemical aspects of the anaerobic degradation of the dairy wastewater. *Water Research*. Vol. 29 (6), pp 1549 – 1554.
31. PRETURY, R. y LETTINGA, G., 1997. Digestion of a Milk – fat emulsion. *Bioresource Technology*. Vol. 61, pp 141-149.

32. RIZEMA, A., 1988. Anaerobic treatment of wastewater with high concentration of lipids and sulphate. Ph Thesis, Wageningen Agricultural University, Wageningen. The Netherlands.
33. RIZEMA, A., ALPHENAAR, A. y LETTINGA, G., 1993. Anaerobic digestion of long-chain fatty acids in UASB and expanded sludge bed reactors. *Process Biochemistry*, Vol. 28, pp 527-537.
34. ROSAS M, S., 2003. Biodegradación de agua residual de PROUNILAC usando lodos anaerobios. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. pp 46-47.
35. SAYED, S., ZANDEN, J., WIJFFELS, R. y LETTINGA, G., 1988. Anaerobic degradation of the various fractions of slaughterhouse wastewater. *Biological Wastes*. Vol. 23 (2), pp 117-142.
36. SILVA, S. G., 1999. Memorias del 15º Curso Nacional de fabricación de quesos naturales. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México. Pp 135-136.
37. SPREER, R. E.: 1991. Anaerobic Biotechnology for Industrial Wastewater Treatment, *Environmental Science and Technology*, Vol 17, num 9.
38. TCHOBANOGLIOUS, G., y ELIASSEN, R. 1970. Filtration of Treated Sewage Effluent. *J. Sanit Eng.* Vol. 96, p. 243.
39. TCHOBANOGLIOUS, G., y BURTON, F. L., 1991. *Water Engineering: Treatment, disposal and reuse*. McGraw-Hill, Inc., New York.
40. Tebbutt, T. H., 1971. An investigation on tertiary treatment by rapid filtration. *Water Research*. Vol. 5, p. 81.



41. TORRES, B. A. 1999. Definición del suero de queso tipo Oaxaca en la región de Tulancingo y establecimiento del proceso óptimo para obtención de proteínas. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. México.
42. Veisseyre, D., 1988. Lactología técnica, composición, recogida y transformación de la leche. Traducido al español por Jesús Ventanas Barroso. Acribia, S.A. España. pp. 573-576.
43. VIDAL G., CARVALHO A., MENDEZ R., LEMA J. M., 2000. Influence of content in fats and proteins on the anaerobic biodegradability of dairy wastewater. *Bioresourse Technology*. Vol. 74, pp 231-239.
44. Van HAANDEL, A. C., y LETTINGA, G. 1994. Anaerobic Sewage Treatment. A Practical Guide for Regions with a hot climate. John Wiley and Sons Ltd. Chichester.
45. Comisión Nacional del Agua (2004). (disponible en línea en <http://www.cna.gob.mx>). Revisado el 10 de septiembre del 2004